

リングレーザと魚眼カメラを用いた道路トンネル断面の3次元計測

東京大学 学生会員 ○伊賀上 卓也
(株)大林組 正会員 吉田 健一
東京大学

非会員 樋口 寛 非会員 井倉 幹大
正会員 伊藤 哲 正会員 谷口 信博
正会員 山下 淳 非会員 浅間 一

1. はじめに

トンネル出来形計測はトンネルの設計値とのずれを評価する重要な作業であり、現在は断面の高さや幅等の単純な項目がテープで計測されている。ところが、現状の項目では複雑なトンネルの形状を十分に評価できず、より多くの3次元座標情報の取得が望まれている。また、計測作業は複数人で時間をかけて行っており、施工を妨げないためにより簡便に出来形を評価することが必要とされている。したがって、密な3次元形状を短時間に取得できれば、情報量、計測速度ともに満足でき有用である。

3次元計測手法の1つとして光切断法がある[1]。光切断法では線状の密な計測を1度の撮影で行うことができ高速である。そのため、トンネル断面の3次元計測に光切断法を利用できれば、高速に密な点群を取得できる可能性がある。そこで、本研究ではリングレーザと魚眼カメラを用いた光切断法によるトンネル断面計測を行い、その有効性を検証した。

2. 光切断法の原理

光切断法による3次元計測の原理を図1に示す。光切断法による計測は位置関係が固定されたカメラとレーザにより行われる。ラインレーザを壁面に向けて照射すると線状のレーザが投影される。このレーザをカメラから撮影することで、レーザ進行方向とカメラ光線ベクトルによる三角測距が可能となる。

3. リングレーザと魚眼カメラを用いた光切断法

リングレーザと魚眼カメラを用いた光切断法の概略図を図2に示す。リングレーザはスポットレーザの先端に頂角が直角の円錐状のミラーを設置したレーザであり、360度方向に同時にレーザを照射することができる。この特性を利用し、360度に投影されたレーザ光を1度に撮影し、トンネル断面の3次元計測を行う。また、カメラ光軸から離れた点ほど視野の外側に写るため、トンネルのような大型構造

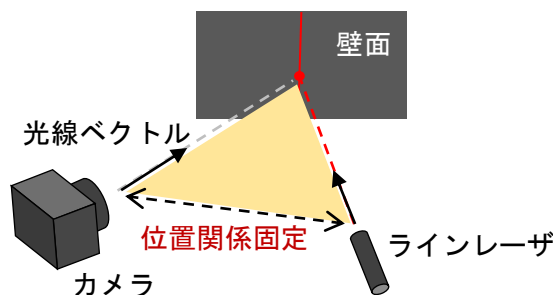


図1 光切断法の概略図

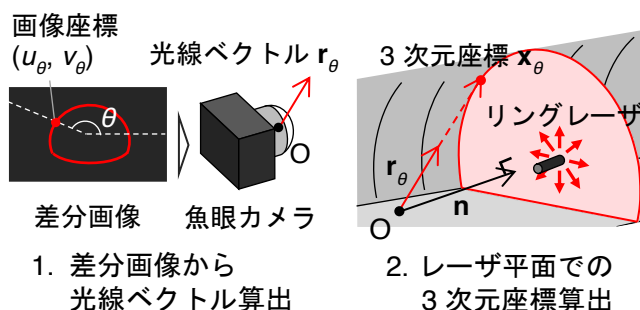


図2 リングレーザを用いた光切断法

物の計測に通常視野のカメラを用いると、壁面に投影されたレーザが視野外となる。そこで、魚眼カメラを用いることで広視野を確保する。

3次元座標の算出では、まず、魚眼カメラ画像からレーザが投影された点の光線ベクトルを算出する。続いて、リングレーザが形成する平面と光線ベクトルの位置関係から3次元座標を算出する。

3. 1. レーザ光線ベクトルの算出

魚眼カメラ画像からの光線ベクトル算出では、まず、環境光の影響を除去するために、レーザを照射した場合と照射しない場合の差分画像を取得する。続いて、差分画像を一定角度ずつ回転させながらレーザの画像座標を回転角度ごとに算出する。回転された画像の中心から右方向に輝度重み付き重心を算出し、回転を戻したときの重心をレーザの画像座標とする。そして、魚眼カメラの歪みを除去可能なカメラモデルにより、レーザの画像座標から回転角度 θ における光線ベクトル $\mathbf{r}_\theta$ を算出する。

キーワード 道路トンネル, 断面計測, 3次元計測, 光切断法

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科 TEL 03-5841-6457

3. 2. 3 次元座標の算出

リングレーザの平面性を利用すると、角度 θ における 3 次元座標 $\mathbf{x}_\theta$ は次式を解くことで求められる。

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_\theta &= s\mathbf{r}_\theta, \\ \mathbf{n}^\top(\mathbf{x}_\theta - \mathbf{n}) &= 0,\end{aligned}$$

ここで、 $\mathbf{n}$ はカメラ原点からレーザ平面への垂線ベクトルであり、事前にキャリブレーションにより求める。

4. トンネル計測実験

リングレーザと魚眼カメラを用いた光切断法の有効性検証を行うために、道路トンネル断面の計測実験を行った。トンネル断面計測装置を図 3 に示す。計測装置の魚眼カメラには AF-S Fisheye NIKKOR 8-15mm f/3.5-4.5E ED を装着した Nikon D850 を用いた。魚眼カメラとリングレーザの距離は約 1.4 m に固定した。計測対象のトンネルはコンクリートを吹き付けた状態であり、トンネル径は約 5 m であった。計測は車両進行方向に装置を移動させながら行い、4 m 間隔で 13 断面分計測した。光切断法における角度の分割数は 1000 とした。

精度評価として、ノンプリズム式トータルステーション（以下 TS）による 3 次元計測結果と比較した。光切断法と TS の計測点を一致させるために、レーザを壁面に照射したのち、そのレーザに合うようにマーカを 1 断面あたり 6 点設置した。設置完了後、TS によるマーカ座標の 3 次元計測を行った。TS の計測点と Iterative Closest Point アルゴリズムにより座標系を一致させ、その際の二乗平均誤差を評価した。

5. 計測結果と考察

計測状況を図 4 に、計測結果を図 5 に示す。図 5 は光切断法による計測結果と TS による計測結果を 1 断面分同一の座標系に配置したものである。TS による計測点数は 6 点であるのに対し、提案手法では 1 度の撮影で 873 点の密な点群が取得され、断面の概形を確認できる。光切断法ではカメラ画像のピクセル分解能で 3 次元座標を計測することができるため、さらに細かく画像の回転角度を分割することでさらに密な断面計測を行うことが可能である。また、提案手法の TS に対する誤差は、13 断面で平均 27.77 mm、分散 7.93 mm であった。誤差の原因として、魚眼画像の歪みを補正するパラメータの推定誤差が考えられる。今後パラメータ推定精度を向上さ

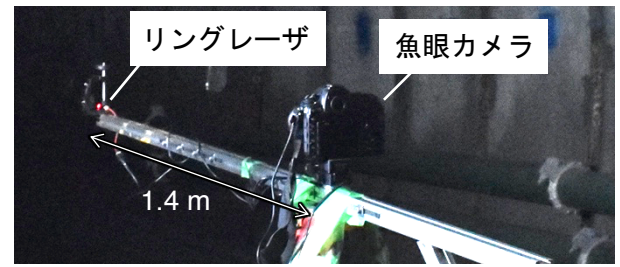


図3 トンネル断面計測装置



図4 トンネル断面の計測状況

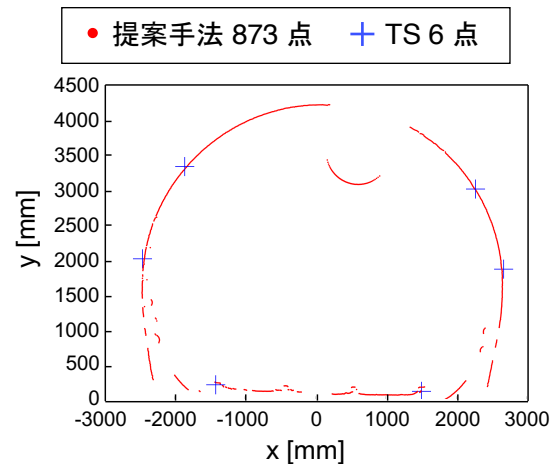


図5 断面計測結果

せることで、3 次元計測精度向上が見込まれる。

6. おわりに

本稿では、リングレーザと魚眼カメラを用いた光切断法によるトンネル断面 3 次元計測の有効性検証を行った。道路トンネルを計測した結果、提案手法により密な 3 次元点群を取得した。また、提案手法の TS に対する 3 次元計測誤差は 27.77 ± 7.93 mm であった。今後はキャリブレーション精度向上、複数断面の座標系統合を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省関東地方整備局技術シーズマッチングの委託研究で行った。

参考文献

- [1] Higuchi *et al.*, “3D Measurement of Large Structure by Multiple Cameras and a Ring Laser,” J. Robot. Mechatron., vol. 31, no. 2, pp. 251–262, 2019.